URSI GASS 2023，札幌，日本，*2023*年*8*月*19*日至*26*日

平稳性 评估高移动性 6 GHz 以下频段及毫米波非广义宽平稳非相关散射信道 ls

Danilo Radovic*(1)、Faruk Pasic(1)、Markus Hofer(2)、Herbert Groll(1)、Christoph F. Mecklenbräuker(1) 和 Thomas Zemen(2)(1) 维也纳工业大学，奥地利维也纳；电子邮箱：danilo.radovic@tuwien.ac.at (2) AIT Austrian Institute of Technology GmbH，维也纳

arXiv:2304.00870v2 [eess.SP] 9 Nov 2023

摘要

无线通信系统的分析与建模取决于宽平稳非相关散射（WSSUS）假设是否成立。然而，在高移动性场景中，WSSUS 假设仅在较短时间内近似成立。本文聚焦于高移动性多频段信道的平稳性评估，并评估 WSSUS 近似成立的时间，即平稳时间。研究基于两个频段（2.55 GHz 和 25.5 GHz）的实测高移动性信道开展。此外，我们展示了用户速度对平稳时间的影响。结果表明，发射机与接收机之间的相对速度增大时，平稳时间会缩短。此外，我们还展示了 6 GHz 以下频段信道与毫米波信道的平稳区域具有相似性。最后，我们证明，6 GHz 以下频段信道的平稳时间较长。

1 引言

高速移动通信在车载领域、高速铁路、无人机（UAV）通信等领域日益发展。然而，为了提供可靠的数据通信，我们需要进一步了解高速移动无线信道。此外，信道建模依赖于对实际测量信道的精确表征。由于通信参与者以高速移动，我们必须应对快速变化的传播条件。因此，广义平稳不相关散射（WSSUS）假设在时间和频率上的适用性有限。此外，容量需求给拥挤的 6 GHz 以下频谱带来了沉重负担。作为一种可能的解决方案，有人提出在表征较少的毫米波（mmWave）频谱中进行数据卸载。因此，本文比较了以下频段测量的平稳性特征：

D. Radovic 和 F. Pasic 的研究得到了奥地利研究促进局（FFG）通过研究项目 Intelligent Intersection（未来 ICT，资助编号 880830）提供的支持。M. Hofer 和 T. Zemen 的研究得到了奥地利技术研究院 AIT 的 DEDICATE 项目（首席科学家资助）的支持。

2.55 和 25.5 GHz。确定 WSSUS 假设近似成立的最长时间范围至关重要。我们将这一时间范围定义为平稳时间。

文献 [1, 2] 给出了非广义宽平稳非相关散射信道的统计表征理论方法。作者介绍了与时频（TF）相关的功率谱表示，即局部散射函数（LSF）。此外，作者将满足 WSSUS 的条件定义为：局部散射函数在给定的时间和频率范围内保持恒定。多项研究分析了实测 6 GHz 以下无线信道的平稳性，见 [3, 4, 5, 6]。研究得出结论，最小平稳区域在时域约为 40 ms。文献 [6] 研究了通信参与者的速度对平稳时间的影响。根据测量结果，作者认为相对速度越高，平稳时间越短。文献 [7, 8] 首次评估了高移动性毫米波信道的平稳性。文献 [7] 分析了高速公路环境中 28 GHz 信道的平稳时间。结果表明，当发射端（TX）与接收端（RX）之间的相对速度为 100 km/h 时，平稳时间为 2–9 ms。文献 [8] 显示，在 60 GHz 城市场景中，当相对速度为 56 km/h 时，平稳时间为 5–16 ms。最后，文献 [9] 评估了静态环境中的多频段平稳性。作者表明，中心频率高于 6 GHz 的信道，其空间平稳区域比传统 sub-6 GHz 频谱中的信道更短。

论文贡献：本文对实测高速信道进行了平稳性评估。据我们所知，本研究首次基于可重复测量对真实信道进行平稳性评估。可重复测量是指多次测量信道（每次仅改变一个特定参数），同时沿完全相同的路径移动，并保持散射环境不变。因此，这使我们能够区分各个参数（移动速度和中心频率）的单独影响。据我们所知，我们首次评估了参与者速度对毫米波空间平稳性分布以及平稳时间长度的影响。其次，我们比较了 6 GHz 以下频段与

本文版权归作者所有。本文发表于本会议论文集，并根据《授予*URSI*和*IEICE*学术作品出版相关权利的协议》授予的许可，收录于 *IEEE Xplore* 等档案库。

毫米波信道。

2 测量设置

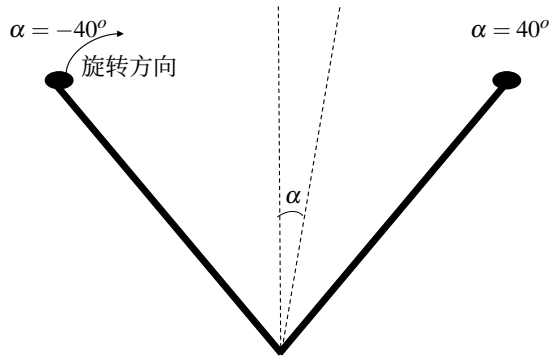


图1. 测量设置：发射端定义的移动。

本文评估了实测高移动性信道。测量活动在受控的室内实验室场景中进行。发射机安装在一条长 1 m 的旋转臂上（图 1）。旋转臂达到恒定速度后开始测量。对于每种场景，旋转臂沿完全相同的路径移动，测量信道；其角度相对于垂直轴从 $\alpha = -40^o$ 到 $\alpha = 40^o$ 变化。在多频段测量中，不同的发射天线放置在完全相同的位置。接收机固定在相邻房间内，距发射机 8 m。该设置能够在高移动性场景下，对 6 GHz 以下频段与毫米波系统的小尺度衰落和快速衰落进行公平比较。在每种场景中，带宽 $B = 100$MHz 设定为，且包含 500 次时域信道测量。为保持时域采样点数量恒定，速度为 40 km/h 和 100 km/h 时，子载波间隔分别设为 400 kHz 和 1 MHz。本文评估了在 2.55 GHz 和 25.5 GHz 下、速度为 40 km/h 和 100 km/h 时测得的信道。测量设置详见 [10, 11]。

3 平稳性评估

第2节所述的测量信道由其时变信道传递函数定义

$$H[s,q] = H(sT_\mathrm{s}, qf_\mathrm{s}), \tag{1}$$

其中，$s \in [1,\cdots,S]$ 分别为时间索引，$q \in [1,\cdots,Q]$ 为频率索引；T_s 和 f_s 分别为采样时间和采样频率。由于高移动性信道属于非广义宽平稳非相关散射，我们定义时频子区域，并假设这些区域内具有平稳性。我们将这些区域记为局部信道传递函数 (LCTF)$\mathbf{H}_{k_\mathrm{t}}[s',q']$，其在时间和频率上的跨度分别为$NT_\mathrm{s}$和$Mf_\mathrm{s}$。$s'$ 和q' 分别为局部时间索引和局部频率索引，k_t 表示每个局部区域的索引

$$k_\mathrm{t} \in [1,\cdots,K_\mathrm{t}],\ K_\mathrm{t} = \left\lfloor \frac{S-N}{\Delta_t} \right\rfloor + 1, \tag{2}$$

相邻两个 LCTF 之间的时间偏移为 $\Delta_\mathrm{t}T_\mathrm{s}$。选择 N 时，需要在平稳性评估的准确度与 LSF 多普勒分辨率之间权衡。增大 N 可能会违反平稳性假设，但可提高 LSF 多普勒分辨率；该分辨率与 NT_s成反比。信道测量带宽为 100 MHz，对应的时延分辨率为 10 ns。因此，我们假设整个带宽内均具有平稳性，并着重确定平稳时间。计算 LSF 时，我们旨在尽可能减小谱估计的方差。因此，我们采用多窗谱估计器，通过应用二维谱窗函数 $G_\mathrm{w}[s',q'] = u_\mathrm{i}[s']\tilde{u}_\mathrm{j}[q']$，生成旁瓣较低的时频受限谱估计，如 [12] 所示。u_i和 $\tilde{u}_i$ 为离散长球面序列 (DPSS)，其由能量集中带宽 ($2W_\mathrm{t}$, $2W_\mathrm{f}$) 以及时间域和频率域中的序列数量 (I, J) 描述。此处需要在谱分辨率与旁瓣电平之间权衡。我们分别设置时间域和频率域的 $W_\mathrm{t} = 2, \mathrm{I} = 2$ 和 $W_\mathrm{f} = 1, \mathrm{J} = 1$ 离散长球面序列参数。此外，我们定义加窗后的信道传递

$$\hat{\mathbf{H}}_{k_\mathrm{t}}^{(G_\mathrm{w})} = \mathbf{H}_{k_\mathrm{t}} \odot \mathbf{G}_\mathrm{w}, \tag{3}$$

其中，$\odot$表示哈达玛积。接下来，我们得到加窗多普勒变异冲激响应

$$\hat{\mathbf{S}}_{k_\mathrm{t}}^{(G_\mathrm{w})} = \mathbf{F}_N \hat{\mathbf{H}}_{k_\mathrm{t}}^{(G_\mathrm{w})} \mathbf{F}_M^H, \tag{4}$$

$\mathbf{F}_i$ 和$\mathbf{F}_i^H$分别表示大小为i的离散傅里叶变换（DFT）矩阵和逆离散傅里叶变换（IDFT）矩阵。我们通过对IJ 个加窗多普勒变异冲激响应进行均匀加权来计算局部散射函数（LSF）

$$\hat{\mathbf{C}}_{k_\mathrm{t}} = \frac{1}{IJ} \sum_{w=1}^{IJ} \left| \hat{\mathbf{S}}_{k_\mathrm{t}}^{(G_\mathrm{w})} \right|^2. \tag{5}$$

我们将信道平稳区域定义为局部散射函数（LSF）近似恒定的一段时间。因此，我们采用共线性谱距离度量进行双时刻LSF比较

$$\gamma^{(t)}[k_\mathrm{t}, k_{\Delta t}] = \frac{\langle \hat{\mathbf{C}}_{k_\mathrm{t}}, \hat{\mathbf{C}}_{k_{\Delta t}} \rangle_\mathrm{F}}{\sqrt{\left\| \hat{\mathbf{C}}_{k_\mathrm{t}} \right\|_\mathrm{F}^2 \cdot \left\| \hat{\mathbf{C}}_{k_{\Delta t}} \right\|_\mathrm{F}^2}}, \tag{6}$$

其中 $\langle \mathbf{A}、\mathbf{B} \rangle_\mathrm{F} = \sum_{i、j} A[i,j]B[i,j]$和 $\|\mathbf{A}\|_\mathrm{F} = \sqrt{\langle \mathbf{A}、\mathbf{A} \rangle_\mathrm{F}}$分别表示弗罗贝尼乌斯内积和弗罗贝尼乌斯范数。$k_\mathrm{t}$ 和$k_{\Delta t}$ 分别表示参考 LSF 和移位 LSF 的时间索引。共线性是一种取值介于 0 和 1 之间的有界度量，其中 1 表示矩阵完全相同，0 表示矩阵完全不相似。为进行评估，我们将信道平稳定义为共线性高于所定义截止值的持续时间

$$\begin{aligned} t_\mathrm{stat}[k_\mathrm{t}] &= (N + (k_{\Delta t} - 1)\Delta_\mathrm{t})T_\mathrm{s}, \\ \forall k_{\Delta t} &: \gamma^{(t)}[k_\mathrm{t}, k_{\Delta t}] > 0.9. \end{aligned} \tag{7}$$

本文版权归作者所有。本文发表于本会议论文集，并根据“授予*URSI*和*IEICE*学术作品出版相关权利的协议”授予的许可，收录于*IEEE Xplore*等档案库中。

4 结果

为在不同速度下建立可比的运动表示，我们定义 $\alpha \widehat{=} (k_{\mathrm{t}} - 0.5)\Delta_{\mathrm{t}} T_{\mathrm{s}}$ 和 $\Delta\alpha \widehat{=} (k_{\Delta t} - 0.5)\Delta_{\mathrm{t}} T_{\mathrm{s}}$。它们分别表示参考 LSF 和时间移位 LSF 在弧线上的角中心位置（图 1）。如第 3 节所述，LCTF 尺寸的选择需要在平稳性评估的准确性和 LSF 多普勒分辨率之间权衡。一方面，选择较大的N 可能会破坏一个 LCTF 内的平稳性假设。另一方面，减小N 会降低 LSF 多普勒分辨率。随着发射端速度提高，多普勒频移成比例增加。通过设置相同的角运动范围来定义 LCTF，我们在两种速度下相对于最大多普勒频移获得相同的 LSF 多普勒分辨率。在 25.5 GHz 频段，对于两种速度，我们均设置$N = 25$，对应于4° 旋转臂的角运动。对于本文所述的所有评估，我们保持 LCTF 时间偏移为 $\Delta_{\mathrm{t}} = 2$，对应于 0.32° 的角分辨率。

图 2 展示了$f_{\mathrm{c}} = 25.5$GHz 下的平稳性评估。对角线表示局部散射函数与其自身的共线性。沿 x 轴远离对角线移动时，我们将局部散射函数与时域中后续的局部散射函数进行比较。观察发射端速度为 40 km/h（图 2a）和 100 km/h（图 2b）时 25.5 GHz 频段的平稳性评估，可以发现两者的空间平稳性分布高度相似。图 3 比较了不同速度下的平稳时间。为公平地进行时域比较，我们为两种速度设置了相同的 LCTF 时长，即 2.5 ms。我们注意到，低速时可见的平稳时间峰值会随着速度增加而降低。

此外，我们评估了 2.55GHz 频段的平稳时间。由于多普勒频移与中心频率成正比，6 GHz 以下频段的多普勒频移远低于毫米波。因此，为保持较高的多普勒分辨率，我们以牺牲空间分辨率为代价增加 LCTF 的长度。我们设置$N = 100$，对应于 16^o 的角运动。首先，与毫米波信道相比，我们观察到更大的平稳区域。其次，我们注意到两个频段之间存在相似之处：

- 在 $\alpha < -27^\circ$ 和 $14^\circ < \alpha < 25^\circ$处的平稳区域较小，且
- $-27^\circ < \alpha < 14^\circ$ 和 $\alpha > 25^\circ$处的平稳区域较大。

近期文献表明，两个频段中都能观察到显著散射体 [13, 14, 15]，这可以解释 6 GHz 以下频段与毫米波频段之间的相似性。

5 结论

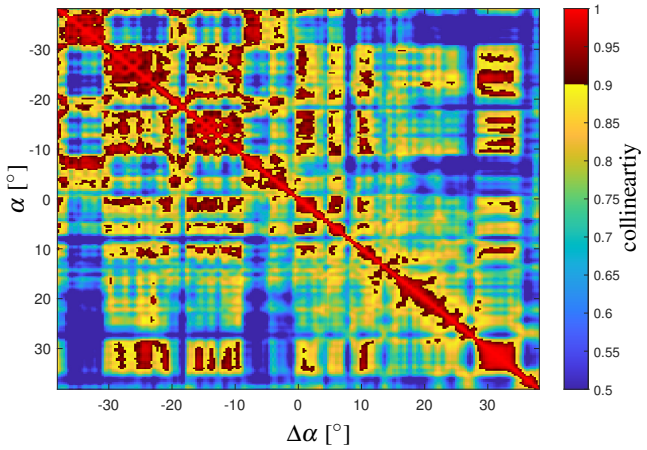
本文评估了实测高移动性多频段无线信道的平稳区域。我们将平稳区域定义为局部散射函数（LSF）近似保持不变的最大时间长度。

测量活动是在受控实验室环境中进行的。这种环境使我们能够进行可重复测量，并展示特定参数的影响。我们证明，在比较发射机以不同速度移动的场景时，空间域中的平稳性具有很高的相似性。此外，这意味着速度增加时，平稳时间会缩短。我们还证明了 6 GHz 以下频段与毫米波无线信道在空间平稳性方面具有相似性。尽管如此，我们也表明，6 GHz 以下频段信道在时域具有更大的平稳区域。

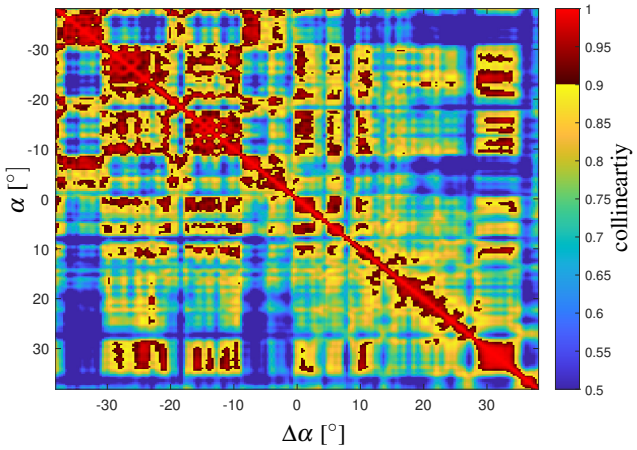
参考文献

[1] G. Matz，《双重欠扩展非广义宽平稳非相关散射信道：信道统计特性的分析与估计》，载于*2003*年第*4*届*IEEE*无线通信信号处理进展研讨会（*SPAWC 2003*）（*IEEE*目录号*03EX689*），2003年，第190–194页。[2] ——，《非广义平稳不相关散射无线衰落信道》，载于*IEEE* 无线通信汇刊，第4卷，第5期，第2465–2478页，2005年。[3]A. Paier等，《利用局部散射函数表征高速公路和城市场景中非广义平稳不相关散射车载信道》，载于*2008*年国际*ITG* 智能天线研讨会，2008年，第9–15页。[4] L. Bernadó、T. Zemen、F. Tufvesson、A. F. Molisch 和 C. F. Mecklenbräuker，《车载无线信道中宽平稳非相关散射假设的（不）成立》，载于*2012*年*IEEE*第*23*届国际个人、室内和移动无线电通信研讨会（*PIMRC*），2012年，第1757–1762页。[5]——，《安全相关场景下非平稳车载信道的时延扩展和多普勒扩展》，载于*IEEE* 车辆技术汇刊，第63卷，第1期，第82–93页，2014年。[6] R. He等，《车间无线信道准平稳区域的表征》，载于*IEEE* 天线与传播汇刊，第63卷，第5期，第2237–2251页，2015年。

本文的版权归作者所有。本文发表于本会议论文集，并根据《授予*URSI*和*IEICE*学术作品出版相关权利的协议》授予的许可，收录于*IEEE Xplore*等档案库。



(a) 发射端速度 40 公里/小时，局部平稳区间 6.25 毫秒 ≙ 4.00^o



(b) 发射端速度 100 公里/小时，局部平稳区间 2.50 毫秒 ≙ 4.00^o

图 2. $f_c = 25.5$ GHz、B=100MHz 的平稳性评估。

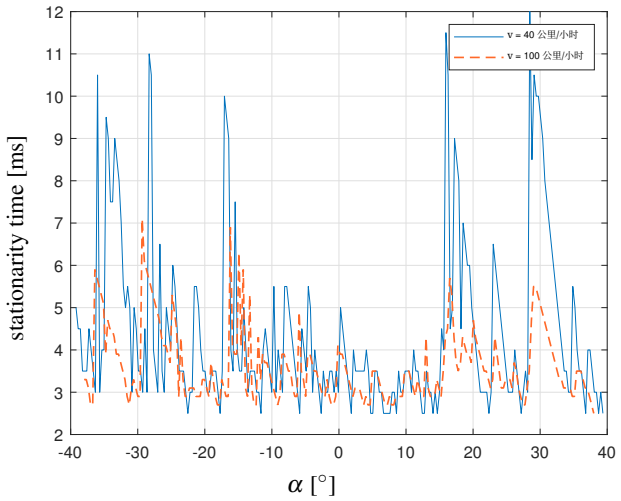


图 3. $f_c = 25.5$GHz 下，发射端速度为 40 与 100 公里/小时的平稳时间；局部平稳区间为 2.50 毫秒。

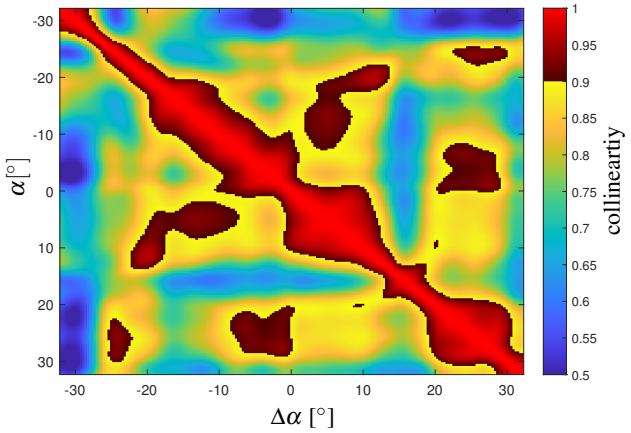


图 4. f_c = 2.55GHz 下的平稳性评估；发射端速度为 100km/h，局部平稳区间为 10.00 ms≙ 16.00^o。

[7] J.-J. Park、J. Lee、K.-W. Kim、M.-D. Kim、H.-K. Kwon 和 K. C. Lee，《基于28 GHz测量的高速公路毫米波信道广义平稳性》，载于*2019*年*IEEE*第*90*届车辆技术会议（*VTC2019-Fall*），2019年，第1–5页。[8]D. Radovic、H. Groll 和 C. F. Mecklenbräuker，《实测非广义平稳不相关散射 60 GHz 毫米波车对车信道的平稳区域评估》，第1–5页，2022年。 [在线]。可访问：https://arxiv.org/abs/2210. 02923[9] Y. Tan、C.-X. Wang、J. O. Nielsen 和 G. F. Pedersen，《2 GHz至30 GHz无线信道平稳区域的比较》，载于*2017*年第*13*届国际无线通信与移动计算会议（*IWCMC*），2017年，第647–652页。[10]F. Pasic等，《高速条件下6 GHz 以下与毫米波无线信道测量的比较》，载于*2022*年第*16*届欧洲天线与传播会议（*EuCAP*），2022年，第1–5页。[11] ——，《城市环境中5.9 GHz高速移动无线信道测量》，载于*2022*年国际巴尔干通信与网络会议（*BalkanCom*），2022年，第100–104页。[12]D. Slepian，《长椭球波函数、傅里叶分析与不确定性——V：离散情形》，载于*Bell* 系统技术期刊，第57卷，第5期，第1371–1430页，1978年5月。[13] D. Dupleich等，《面向5G及后续技术的街谷场景多频段传播与无线信道特性表征》，载于*IEEE Access*，第7卷，第160 385–160 396页，2019年。[14] M. Boban等，《存在车辆遮挡时的多频段车间信道表征》，载于*IEEE Access*，第7卷，第9724–9735页，2019年。

本文的版权归作者所有。本文发表于本会议论文集，并根据《授予*URSI*和*IEICE*学术作品出版相关权利的协议》所授予的许可，收录于 *IEEE Xplore* 等档案库。

[15] M. Hofer等，“厘米波和毫米波频段的无线车载多频段测量”，载于*2021*年*IEEE*第*32*届个人、室内和移动无线电通信年度国际研讨会（*PIMRC*），2021年，第836–841页。

本文的版权归作者所有。本文发表于本会议论文集，并依据《授予*URSI*和*IEICE*学术作品出版相关权利的协议》授予的许可，收录于*IEEE Xplore*等档案库。